

Bolygókeletkezési tartományok nagyfelbontású spektroszkópiája

Doktori értekezés tézisei

Szerző: Regály Zsolt

EÖTVÖS LORÁND TUDOMÁNYEGYETEM, TERMÉSZETTUDOMÁNYI KAR

FIZIKA DOKTORI ISKOLA

RÉSZECSCFIZIKA ÉS CSILLAGÁSZAT DOKTORI PROGRAM

A Doktori Iskola vezetője: Dr. Csikor Ferenc egyetemi tanár (MTA doktora)

A Doktori Program vezetője: Dr. Csikor Ferenc egyetemi tanár (MTA doktora)

Konzulensek: Prof. Dr. Cornelis Petrus Dullemond

Institut für Theoretische Astrophysik, Universität Heidelberg

Dr. Sándor Zsolt (PhD)

Max-Planck-Institut für Astronomie, Heidelberg

Dr. Ábrahám Péter (MTA doktora)

MTA Konkoly Csillagászati Kutatóintézet

Dr. Kiss L. László (MTA doktora)

MTA Konkoly Csillagászati Kutatóintézet

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Budapest

2011

I. Bevezetés

Ez idáig közel ötszáz Naprendszeren kívüli bolygót, úgynevezett exobolygót ismertünk. Ma úgy gondoljuk, hogy az exobolygók – ahogy Naprendszerünk bolygói is – a fősorozat előtti csillagok körüli korong anyagából (protoplanetáris korongból) születnek meg. A protoplanetáris korongokat lényegében a csillagokat létrehozó ködök összehúzódása után visszamaradt anyag alkotja. Hagyományos csillagászati módszerek – mint például radiálissebesség-mérések vagy nagykontrasztú közvetlen képalkotási eljárások – segítségével eddig nem sikerült formálódó bolygókat felfedezni. Azonban a bolygókeletkezési folyamatok teljesebb megértéséhez nélkülözhetetlen lenne fiatal, még a szülőanyagukba beágyazódott bolygók felfedezése.

A bolygómag-akkréciós elméletek (core-accretion theory) szerint az óriásbolygók a protoplanetáris korongok belső, gázban gazdag tartományaiban születnek. A protoplanetáris korong ezen régióiból a szén-monoxid molekula (CO) erős emissziós, illetve abszorpciós sugárzása várható a közeli-infravörös ($4,7\ \mu\text{m}$) tartományban. Ennek köszönhetően a protoplanetáris korongok nagyfelbontású közeli-infravörös spektroszkópiájának segítségével feltérképezhetjük a bolygókeletkezési tartományokat, ami segítséget nyújthat a bolygók keletkezésének megértéséhez.

II. Tudományos célkitűzések

PhD dolgozatomban azt szándékoztam megvizsgálni, hogy vajon a lokális, illetve globális korongexcentricitás észlelhető vonalprofil-torzulásokat okoz-e a CO-molekula közeli-infravörös spektrumában. Lokális korongexcentricitás esetén még formálódó óriásbolygók válhatnak észlelhetővé, ami a bolygókeletkezési elméletek tökéletesítését eredményezhetné. Mivel a bolygómag-akkréciós elméletek szerint a bolygókeletkezést lényegesen befolyásolja a korong globális excentricitása, annak meghatározása által fontos következtetéseket vonhatnak le ezen elméletre vonatkozóan. Ezért a ma működő műszerek, mint például az ESO VLT (Very Large Telescope) teleszkópjára szerelt CRIRES (CRiogenic high-resolution InfraRed Echelle Spectrograph), vagy a jövőben megépülő E-ELT (European Extremely Large Telescope) távcsőre szánt METIS (Mid-infrared E-ELT Imager and Spectrograph) segítségével elvégezhető nagyfelbontású közeli-infravörös CO-spektroszkópia újszerű módszereket nyújthat a bolygókeletkezési elméletek vizsgálatához és tökéletesítéséhez.

Mára világossá vált, hogy az elegendően nagy tömegű bolygók rést nyitnak a protoplanetáris

korongjukban. Legutóbbi numerikus vizsgálatok megmutatták, hogy egy nagy tömegű bolygó ($\geq M_{\text{Jup}}$) által nyitott rés a bolygó gravitációs perturbációja miatt nem körszimmetrikus, hanem elliptikus alakú. A 3:1-es Lindblad-rezonanciáknak a keringő bolygók általi gerjesztése a korong lokális excentricitásának kialakulásához vezet. A hangsebesség feletti sebességperturbációk – mint például egy excentrikus pályán mozgó gáz – a körszimmetrikus kepleri korongokban keletkező szimmetrikus, dupla csúcús vonalprofilokhoz képest torzult vonalprofilokat eredményeznek. Így a protoplanetáris korongjukba még beágyazódott óriásbolygók észlelhetővé válhatnak az általuk okozott vonalprofil-torzulás miatt, ha a korong perturbált tartománya számottevő járulékot ad a korong teljes CO fluxusához.

A közepes szeparációjú ($20 \text{ CSE} \leq a_{\text{bin}} \leq 40 \text{ CSE}$) fiatal kettőscsillagok korongjainak rezonáns gerjesztési folyamatát leíró elmélet szerint a főkomponens körül kialakuló korong teljes mértékben excentrikussá válik. Korábbi numerikus vizsgálatokkal összhangban, saját vizsgálataim (α -típusú viszkózitást feltételezve) igazolták, hogy a közepes szeparációjú kettőscsillagok főkomponensének korongjában a gáz mindenhol excentrikus pályán mozog, azaz a korong globálisan excentrikus. Mivel a globális korongexcentricitás szuperszonikus sebességperturbációt okoz a korong teljes tartományán, a CO-molekula közeli-infravörös emissziós vonalai várhatóan erősen torzulnak, mely felhasználható lenne a korong excentrikusságának meghatározásához.

III. Az alkalmazott módszerek

A protoplanetáris korong atmoszférájában keletkező emissziós és abszorpciós CO-vonalak modellezése céljából kétdimenziós szemianalitikus sugárzási energiatranszport modellprogramot fejlesztettem. Ez a kód a Chiang és Goldreich (1997) által leírt kétrétegű felfúvódott (flaring) korongmodellen alapul, melyben a központi csillag sugárzása és az akkréciós folyamatok fűtik. A csillag hőmérsékleti sugárzása a korong atmoszféráját fűti, melynek poranyaga átalakítja a csillag sugárzását és besugározza a korong belső tartományait, míg az akkréciós folyamatok a korongbelső közvetlen fűtését eredményezik. Ennek eredményeként a CO-molekula emissziós vagy abszorpciós spektruma az optikailag vastag korongbelső feletti, optikailag vékony korong-atmoszférában keletkezik.

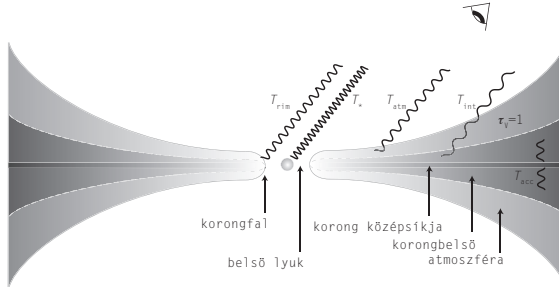
A protoplanetáris korong gázanyagának orbitális sebességperturbációját, melyet egy még a korongba ágyazott bolygó, vagy a közepes szeparációjú kettőscsillag mellékkomponense által kifejtett gravitációs perturbációja okoz, kétdimenziós hidrodinamikai szimulációk segítségével

határoztam meg. A szimulációk során a henger-koordináta-rendszerben felírt kontinuitási és a Navier—Stokes-egyenletet oldottam meg numerikusan. A hidrodinamikai szimulációk során kapott azimutális és radiális irányú sebességeloszlásokat felhasználva, spektrális modellem segítségével kiszámítottam a CO-molekula közeli-infravörös tartományba ($4,7\ \mu\text{m}$) eső vonalprofil-torzulásait.

IV. Tézisek

Protoplanetáris korongok spektroszkópiai modellje

- (1) Chiang és Goldreich (1997) által megalkotott kétrétegű korongmodell felhasználásával IDL programozási környezetben kifejlesztettem egy kétdimenziós, szemianalitikus sugárzási energiatranszport modellt, amellyel a CO-molekula protoplanetáris korongokban keletkező közeli-infravörös ($4,7\ \mu\text{m}$) spektrumát lehet kiszámítani. A CO-molekula gerjesztési állapotainak paramétereit Goorvitch (1994) által közölt módon végeztem. A felfűvődött korongatmoszférába érkező csillagsugárzás behatolási szögének kiszámítását követően meghatároztam az atmoszferikus CO-molekula mennyiségét. A korongatmoszféra és a korongbelső hőmérsékleteloszlását a csillag sugárzása és a korongban zajló akkréció folyamatok figyelembevételével, lokális termodinamikai egyensúlyt feltételezve számítottam ki. A korong egy eleme által kisugárzott emissziós vonal profiljának kiszámítását követően, a korong teljes fluxusát numerikus integrálással, a korong inklinációs szögének figyelembevételével határoztam meg.
- (2) A saját fejlesztésű modell ellenőrzése céljából kiterjedt modellszámításokat végeztem, melynek során nemperturbált, körszimmetrikus kepleri korongokban keletkező CO-spektrumokat számoltam. Eredményeim jól visszaadták a T Tauri csillagok körüli protoplanetáris korongokban keletkező, közeli-infravörös sávú ($4,7\ \mu\text{m}$) CO-emissziós spektrumot.



1. ábra. A kétrétegű, felfuvódott korongmodell, melyben a következő emissziós komponensek lettek figyelembe véve: optikailag vékony, T_{atm} hőmérsékletű atmoszferikus emisszió, a T_{int} hőmérsékletű, optikailag vastag korongbelső felett; a korong belső peremének T_{rim} hőmérsékletű emissziója; a csillag T_* hőmérsékletű feketetest-sugárzása; valamint az akkréciós folyamatok által felfűtött korongbelső kontinuum-emissziója.

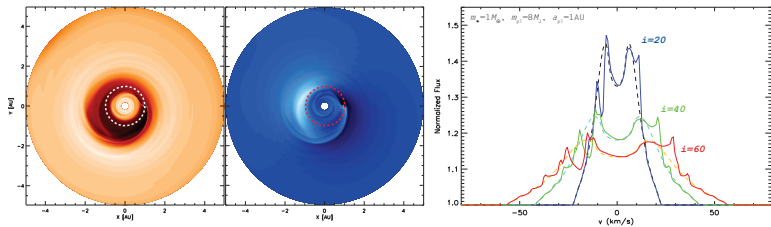
A protoplanetáris korongok spektroszkópai modelljének részletes leírása a Regály et al. (2010a) publikációban került közlésre. Számításaim segítséget nyújtottak a Goto et al. (2011) és a Kóspál et al. (2011) publikációkban.

Beágyazott bolygók észlelhetősége közeli-infravörös CO-spektroszkópiával

- (3) Numerikus hidrodinamikai számítások segítségével megmutattam – α -típusú viszkozitást feltételezve –, hogy a protoplanetáris korongba még beágyazott, nagy tömegű bolygó gravitációs perturbációja lényegesen megváltoztatja a gáz korábban körszimmetrikus kepleri mozgását. A beágyazódott bolygó gravitációs perturbációjának következtében a korong excentrikussá válik a bolygó által nyitott korongrés környezetében.
- (4) Megmutattam, hogy a gázáramlás perturbációja kimutatható, ha összehasonlítjuk a bolygót tartalmazó, illetve a bolygó nélküli korongokban keletkező közeli-infravörös CO-spektrum vonalprofiljait. Azt találtam, hogy a bolygó spektrális jelének két fontos sajátossága van: egy időben állandó vonalprofil-aszimmetria és egy időben változó komponens, amely a bolygó pálya menti fázisával korrelál. Az időben állandó vonalprofil-aszimmetria a bolygó által nyitott korongrés excentrikussága miatt keletkezik, míg az időben változó komponens a keringő bolygó lokális dinamikai perturbációjának következménye. Az állandó aszimmetrikus

komponens alakja és nagysága függ a csillag és a bolygó tömegétől, a bolygó keringési távolságától és a korongrésbeli gáz elliptikus pályájának orientációjától. Az időben változó komponens amplitúdója nagyságrendileg 10%-a teljes vonalfluxusnak, szélessége ~ 10 km/s, mely értékek a korong inklinációs szögétől függenek.

- (5) Megvizsgálva a CO-vonalprofil torzulásait különböző korong-, központi csillag- és bolygó-paraméterek esetén, az alábbi következtetésekre jutottam: a vonalprofil-torzulás annál nagyobb, minél nagyobb inklinációs szög alatt látjuk a korongot; a bolygó spektrális jele erősebbé válik nagyobb bolygótömeg esetén; a bolygó spektrális jele erősödik a központi csillag tömegével, illetve a bolygó keringési távolságának csökkenésével. A korong belső pereménél elhelyezkedő lyuk nagysága lényegesen befolyásolja az óriásbolygó detektálhatóságát, azaz például 0,2 CSE-nél kisebb belső lyuk esetén csak közel keringő bolygók ($\sim 0,5$ CSE), míg 0,4 CSE sugarú belső lyuk esetén már távolabbi bolygók (~ 2 CSE) is észlelhetők. A korong geometriájának mérsékelt hatása van a bolygó spektrális jelére, azaz változó korongvastagság esetén a bolygó spektrális jelének nagysága nem változik. Modellem keretein belül a legkisebb, 1 CSE távolságban keringő bolygó, ami még észlelhető $0,5 M_{\text{Jup}}$ egy $0,5 M_{\odot}$ tömegű központi csillagot feltételezve. Végezetül megállapítottam, hogy T Tauri típusú csillagok körüli protoplanetáris korongokban a $0,2 - 3$ CSE távolságon belül keringő, $\geq 1 M_{\text{Jup}}$ tömegű óriásbolygók észlelhetők – a CRIRES-al végezhető – nagyfelbontású, közeli-infravörös spektrográfiai monitorozással, ha egyéb jelenség nem torzítja, utánozza, vagy fedi el a bolygó spektrális jelét.

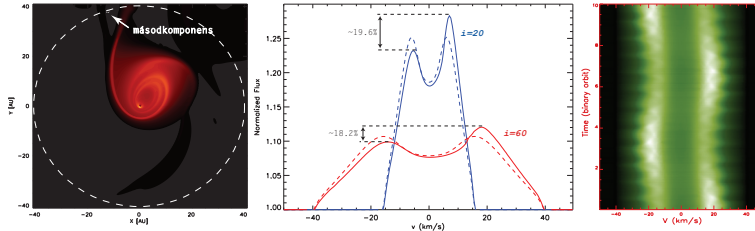


2. ábra. A protoplanetáris korong gázanyagának bolygó által perturbált felületi sűrűségeloszlása (*bal oldalt*) és mozgásának radiális irányú sebességeloszlása (*középen*). A perturbált korongból kisugárzó CO-emisszió vonalprofilja (*jobb oldalt*), 20° , 40° és 60° inklinációs szögek esetén.

A korongba beágyazódott óriásbolygók közeli-infravörös spektroszkópiával történő észlelhetőségéről szóló kutatásom a Regály et al. (2010a) publikációban került közlésre.

Korongexcentricitás spektroszkópiai jelei

- (6) Megvizsgáltam a korongexcentricitás fejlődését közepes szeparációjú (20-40 CSE) fiatal kettőscsillagok főkomponense körüli korongokban, hogy megismerjük az excentricitás nagyságának a kettőscsillag, illetve a protoplanetáris korong paramétereitől való függését. Azt találtam, hogy a kvázistatikus excentrikus állapot mindig kifejlődik a főkomponens körüli korongban egy átlagos korong élettartamánál rövidebb idő ($\sim 5 \times 10^6$ év) alatt, függetlenül a kettős tömegarányától és a korong tömegétől, feltételezve, hogy a korong viszkozitása a széles körben elfogadott tartományon belül van ($0,01 \leq \alpha \leq 0,1$). Kimutattam, hogy a kettős rendszer $e_{\text{bin}} \geq 0,2$ orbitális excentricitása, illetve a korong kis/nagy geometriai vastagsága ($h \simeq 0,01/h \simeq 0,1$) megakadályozhatja a kvázistacionárius excentrikus korong kialakulását. Azt találtam, hogy az excentrikus korong merev testként, retrográd precessziót végez a kettőscsillag keringési periódusidejének 6,5-szerese alatt, miközben a korong excentricitása kismértékben változik a kettőscsillag keringési ideje alatt.
- (7) A hidrodinamikai eredményeket kombinálva az általam kifejlesztett spektrális modellel, kiszámítottam az excentrikus korongokban kialakuló közeli-infravörös CO-vonalprofilokat. Ha a korong excentricitása $\bar{e}_{\text{disk}} \simeq 0,2$ nagyságú 2 – 3 CSE távolságon belül – ahol a főkomponens sugárzásának következtében a közeli-infravörös CO-emisszió keletkezik –, a CO-vonalprofilok aszimmetrikusak lesznek ($A_{\text{pp}} \simeq 20\%$ csúcstól csúcsig mért aszimmetriával). Egy teljes korongprecesszió alatt – ami a kettőscsillag keringési idejének $\sim 6,5$ -szerese alatt zajlik le – a vonalcúcsok aszimmetriája kétszer cserél helyet. Mivel a korong excentricitása kissé megváltozik a másodkomponens keringése során, további vonalprofil-változás észlelhető a vonalak szárnyain, a kettőscsillag keringési időskáláján. Megmutattam, hogy a korong belső tartományának ($\leq 2 - 3$ CSE) excentricitása meghatározható a CO-molekula nagyfelbontású közeli-infravörös vonalprofiljának illesztése segítségével, felhasználva az általam kifejlesztett spektrális modellt. Végezetül megállapítottam, hogy a bemutatott újszerű módszerrel meghatározva a közepes szeparációjú kettőscsillagok főkomponense körüli korongok excentricitását, tovább pontosíthatjuk a bolygómag-akkreció elméletet, mivel a protoplanetáris korongok excentricitása komoly hatással lehet a bolygókeletkezésére.



3. ábra. A másodkomponens pertrubációs hatása miatt excentrikussá váló főkomponens körüli korong (*bal oldalt*). Aszimmetrikus CO-emissziós vonalprofilok, 20° és 60° inklinációs szögek esetén (*középen*). A vonalprofil aszimmetriájának periodikus változása egy teljes korongprecesszió alatt (*jobb oldalt*), melynek időtartama a kettőscsillag keringési periódusának 6,5-szerese. A vonalszármakon megfigyelhető változások periódusa a kettőscsillag keringési periódusnak nagyságába esik.

A közepes szeparációjú kettőscsillagok főkomponense körüli excentrikus korongokról szóló kutatásom a Regály et al. (2011) publikációban került közlésre.

V. Következtetések

Megmutattam, hogy az általam kifejlesztett protoplanetáris korongok spektrális modelljének segítségével jól reprodukálhatók a fiatal ($\sim 2,5 \times 10^6$ év) T Tauri csillagok körüli protoplanetáris korongokban keletkező, dupla csúcsú kepleri CO-vonalprofilok, a széles körben elfogadott por- és gázutajdonságok feltételezése esetén.

A bolygót tartalmazó protoplanetáris korongok körében végzett kutatásaim feltárták, hogy jelentős vonalprofil-torzulások jelennek meg a közeli-infravörös tartományban ($4,7 \mu\text{m}$) keletkező CO-spektrumban, a beágyazott óriásbolygó gravitációs perturbáló hatása miatt. A legalább $1 M_{\text{Jup}}$ tömegű óriásbolygó lényegesen perturbálja a korongbeli gáz mozgását, és időben állandó vonalprofil-aszimmetriát, illetve a bolygó keringési időskáláján változó vonalprofil-torzulást okoz. Az időben állandó vonalprofil-aszimmetria keletkezése az óriásbolygó által nyitott korongrésbeli gáz excentrikus pályájával magyarázható, míg a rövid időskálájú változó komponens az óriásbolygó lokális dinamikai perturbációjával hozható kapcsolatba. Így akár már Jupiter tömegű, T Tauri csillagok körül közeli pályán ($0,2 - 3$ CSE) keringő bolygók is észlelhetők olyan, ma

használatos nagyfelbontású közeli-infravörös műszerekkel, mint a CRIRES.

A közepes szeparációjú kettőscsillagok főkomponense körüli excentrikus korongok körében végzett kutatásaim feltárták, hogy a főkomponens körüli korong excentrikussá válik a kettős rendszer, illetve a korongot jellemző paraméterek széles tartományán, bár a korong kis, illetve nagy geometriai vastagsága vagy a kettős rendszer nagy orbitális excentricitása megakadályozza a kvázistatikus excentrikus állapot kialakulását. A korong bolygókeletkezési tartományon belüli excentricitása meghatározható az észlelt közeli-infravörös CO-vonalprofilok aszimmetriájának illesztésével, felhasználva az általam kifejlesztett spektrális modellt, amely figyelembe veszi a korongexcentricitás által okozott sebességtorzulásokat. Ezen újszerű módszer segítségével a korongexcentricitás meghatározhatóvá válik a CRIRES által felvett spektrumok által, a nagyfelbontású optikai óriástávcsövek (ELT) vagy rádiótávcső-rendszerek (ALMA, E-VLA) korszaka előtt. Mivel a korongexcentricitásnak fontos hatása van a bolygóképződésre, a fent bemutatott módszer segítségével tovább pontosíthatjuk a bolygómag-akkréció elméletet.

A PhD dolgozatomban kifejtett eredmények összefoglalását az IAU 276-os szimpóziumán tartott előadásomban mutattam be (Regály et al. 2010b).

VI. Irodalomjegyzék

A tézis alapjául szolgáló publikációk:

- Regály, Zs.; Sándor, Zs.; Dullemond, C. P.; van Boekel, R: *Detectability of giant planets in protoplanetary disks by CO emission lines*, 2010, A&A **523**, A69. (Regály et al. 2010a)
- Regály, Zs.; Kiss, L.; Sándor, Zs.; Dullemond, C. P.: *High-resolution spectroscopic view of planet formation sites*, 2010, Proc. of IAU Symposium **276**. (Regály et al. 2010b)
- Regály, Zs.; Sándor, Zs.; Dullemond, C. P.; Kiss, L. L.: *Spectral signatures of disk eccentricity in young binary systems. I. Circumprimary case*, 2011, A&A, **528**, A93. (Regály et al. 2011)

A spektroszkópiai modellemhez kapcsolódó további publikációk:

- Goto, M.; Regály, Zs.; Dullemond, C. P.; van den Ancker, M.; Brown, J. M.; Carmona, A.; Pontoppidan, K.; Ábrahám, P.; Blake, G. A.; Fedele, D.; Henning, Th.; Juhász, A.; Kóspál, Á.; Mosoni, L.; Sicilia-Aguilar, A.; Terada, H.; van Boekel, R.; van Dishoeck, E. F.; Usuda,

- T. *Fundamental Vibrational Transition of CO During the Outburst of EX Lupi in 2008*, 2011, ApJ **728**, p5 (Goto et al. 2011)
- Kóspál, Á.; Ábrahám, P.; Goto, M.; Regály, Zs.; Dullemond, C. P.; Henning, Th.; Juhász, A.; Sicilia-Aguilar, A.; van den Ancker, M.: *Near-infrared spectroscopy of EX Lupi in outburst*, 2011, ApJ, accepted. (Kóspál et al. 2011)

Folyamatban levő publikációk:

- Regály, Zs.; Juhász, A.; Sándor, Zs; Dullemond, C. P.: *Possible planet forming regions on submillimeter images*, 2011, MNRAS, submitted (Regály et al. 2011b)
- Regály, Zs.; Király, S.; Ábrahám, P.; Dullemond, C. P.; Juhász, A.; Mosoni, L.; Moór, A.; Kóspál, Á.; Hennning, Th.: *FUoOr and EXor connection* 2011, A&A, in prep. (Regály et al. 2011c)